

Mise en évidence expérimentale de l'instabilité de Rayleigh-Bénard dans le cas de fluides à seuil

Zineddine KEBICHE, Teodor BURGHELEA, Cathy CASTELAIN*

Laboratoire de Thermocinétique de Nantes, LTN UMR CNRS 6607
Polytech, La Chantrerie, rue Christian Pauc 44306 Nantes, cedex03

* (auteur correspondant : cathy.castelain@univ-nantes.fr)

Résumé - De nombreux procédés industriels induisent un transfert de chaleur via la convection thermique. En dépit des larges et nombreuses applications associées aux fluides non newtoniens et plus particulièrement aux fluides viscoplastiques, les études de stabilité pour ces fluides restent très limitées, probablement à cause des difficultés liées au traitement des deux phases. L'objectif de cette étude est de mieux comprendre l'interaction entre une instabilité thermo-convective et les propriétés rhéologiques d'un fluide viscoplastique (Carbopol 980).

Nomenclature

B_m	nombre de Bingham	μ	viscosité dynamique, $Pa.s$
d	épaisseur de la couche fluide, m	τ	Contrainte, Pa
g	accélération gravitationnelle, $m.s^{-2}$	τ_c	contrainte seuil, Pa
κ	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$	$\dot{\gamma}$	vitesse de cisaillement, s^{-1}
R_a	nombre de Rayleigh	ν	viscosité cinématique, $m.s^{-2}$
T	température, K		
α	coefficient de dilatation thermique, K^{-1}		

1. Introduction

De nombreux procédés industriels induisent un transfert de chaleur via la convection thermique. En dépit des larges et nombreuses applications associées aux fluides non newtoniens et plus particulièrement aux fluides viscoplastiques, les études de stabilité pour ces fluides restent très limitées, probablement à cause des difficultés liées au traitement des deux phases. Dans les écoulements rencontrés dans les procédés (échangeurs, mélangeurs), la complexité du couplage entre les écoulements secondaires, les instabilités hydrodynamiques ou convectives et les propriétés rhéologiques non newtoniennes rendent les analyses relativement complexes. Afin de pouvoir découpler les phénomènes, la configuration que nous avons choisie d'étudier est la configuration académique de Rayleigh-Bénard associée à différents types de fluide. Cette configuration permettra de comprendre les phénomènes physiques en l'absence d'écoulement de base. Dans la configuration de Rayleigh-Bénard, l'origine de l'instabilité convective est due à un gradient vertical de température entre deux plaques horizontales qui induisent une force de poussée, caractérisée par le nombre de Rayleigh. L'équilibre entre les facteurs stabilisant et déstabilisant dans cette situation est décrit par le nombre de Rayleigh.

$$R_a = \frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot g \cdot d^3}{\kappa \nu} \quad (1)$$

Où d est l'épaisseur de la couche du fluide, κ sa diffusivité thermique, ν sa viscosité cinématique, α le coefficient d'expansion thermique, ΔT la différence de températures entre les plaques et g l'accélération gravitationnelle.

L'équation (1) n'est applicable que dans le cas d'un fluide à viscosité constante. Dans le cas des fluides à seuil, qui ont une viscosité qui dépend de la vitesse de cisaillement, une contrainte seuil, une transition solide fluide pouvant présenter une hystérésis, et un comportement rhéologique dans lequel il faut tenir compte du glissement, la construction d'un nombre de Rayleigh pour ce type de fluide devient complexe et nécessite l'utilisation du théorème de Buckingham Pi.

L'écoulement de base correspond à un état statique purement conductif. Pour des fluides visqueux, tant que le nombre de Rayleigh est suffisamment petit, les forces de poussée ne peuvent pas vaincre les effets stabilisants de la diffusion visqueuse et thermique. A partir d'une valeur critique Ra_c , l'équilibre est rompu et des rouleaux thermo-convectifs apparaissent (Figure 1). Dans le cas des fluides à seuil, le déclenchement des instabilités ne sera possible que si la force de poussée est suffisamment importante pour vaincre à la fois la contrainte seuil et les effets conjugués de dissipation thermique et visqueuse.

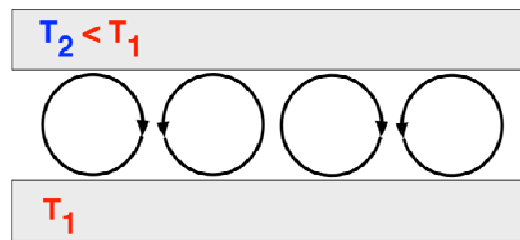


Figure 1 : *Rouleaux convectifs de Rayleigh-Bénard*

La configuration de Rayleigh-Bénard a été largement étudiée pour des fluides newtoniens et représente l'archétype du problème de stabilité, où la bifurcation primaire est supercritique. L'analyse détaillée de ces problèmes est présentée dans [1, 2 et 3]. Cependant la plupart des fluides rencontrés dans les procédés industriels (verres, industries alimentaires, chimiques, fabrication de bétons) ou ceux rencontrés en géologie (laves, manteaux terrestres) sont non-newtoniens.

La plupart des fluides non-newtoniens ont une structure interne microscopique. Si la concentration de ces microstructures est suffisamment forte, la résistance à l'écoulement est importante et peut conduire à un matériau qui ne s'écoule plus en dessous d'une contrainte. Ces fluides sont appelés fluides viscoplastiques ou fluides à seuil. Pour de faibles contraintes, le matériau se comporte comme un gel élastique, voir comme un solide. Au-delà de la contrainte seuil, il s'écoule comme un fluide rhéofluidifiant. La contrainte seuil est communément considérée comme la contrainte de transition entre le comportement solide élastique et le comportement fluide visqueux.

En ce qui concerne les fluides viscoplastiques, la configuration de Rayleigh-Bénard a reçu très peu d'attention. Le premier article qui a traité ce problème est celui de Zhang et al. [4], mais dans le cas d'un fluide de Bingham. L'écoulement de base est statique, et comme la viscosité est indéterminée dans les régions en dessous du seuil, les auteurs montrent dans ce cas, que l'analyse de stabilité basée sur l'approche par modes normaux, ne peut être utilisée. Ils ont montré que l'écoulement est linéairement stable pour tous les nombres de Rayleigh. Ces résultats analytiques sont complétés par une modélisation numérique. Si des perturbations

sont initialement imposées, les résultats numériques trouvés mettent en évidence la diminution des perturbations en un temps fini. Les auteurs montrent donc que les fluides viscoplastiques inhibent l'apparition de la convection lorsque le système est soumis à des perturbations infinitésimales, même si la contrainte seuil est faible. Ces conclusions ont été confirmées par des observations expérimentales de Rust et al. [5]. De récentes expériences ont mis en évidence la présence d'une instabilité pour les fluides ayant une contrainte seuil très faible, Abdelali et al. [6].

L'objectif de cette étude est d'étudier par voie expérimentale le déclenchement et développement éventuel de l'instabilité dans le cas des fluides à seuil, pour la configuration académique de Rayleigh-Bénard. Ce travail passe au préalable obligatoirement par une caractérisation rhéologique fine, le choix d'un modèle le plus proche des propriétés du fluide, et la mise en place d'un dispositif expérimental permettant de détecter l'apparition de l'instabilité dès son déclenchement.

2. Présentation du dispositif expérimental, des techniques de mesure et du fluide utilisé

2.1. Présentation et caractérisation du fluide viscoplastique utilisé

La relation rhéologique entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement de ces fluides peut être linéaire ou non. Les fluides à seuil sont des fluides plastiques dont la structure tridimensionnelle rigide se rompt lorsque la contrainte de cisaillement dépasse une certaine valeur appelée contrainte seuil τ_c . L'écoulement de ces fluides ne se fait qu'à partir de cette contrainte. Le seuil de l'écoulement correspond à la force à appliquer pour séparer les chaînes moléculaires. Dès que l'on dépasse cette contrainte, la structure se rompt totalement et le fluide se comporte comme un vrai fluide visqueux. Si de nouveau la contrainte appliquée devient inférieure à la contrainte seuil la structure se reforme en un temps suffisamment court pour qu'on puisse le négliger. Plusieurs relations constitutives ont été proposées entre la contrainte et le taux de cisaillement de ces fluides (modèle de Bingham, de Herschel-Bulkley et plus récemment celui de Putz et Burghilea [7]).

Les propriétés rhéologiques des solutions ont été étudiées en utilisant un rhéomètre HAAKE MARS (Modular Advanced Rheometer System). Le test rhéologique appliqué est la rampe linéaire de contrainte contrôlée (CS test). Le temps d'application de chaque rampe est de 2 secondes pour chaque valeur de contrainte appliquée sachant que cette dernière varie entre 0.002 Pa et 40 Pa (en montant) puis l'inverse (relaxation). La figure 2 représente les courbes d'écoulement en mode contrainte contrôlée pour un Carbopol 0.05 wt%, et plus particulièrement la relation entre la vitesse de cisaillement (valeurs absolues) et la contrainte appliquée. Pour les différentes concentrations de Carbopol 980 (de 0.05 wt% à 0.5 wt%) la vitesse de cisaillement suit la même allure en fonction de la contrainte appliquée.

Le modèle rhéologique choisi est celui de Putz et Burghilea. On peut distinguer trois zones de variation citées par Putz and Burghilea [7]:

- Un état de déformation élastique solide: $\sigma < \sigma_1$ pour des faibles valeurs de contrainte appliquée, cette déformation est caractérisée par une dépendance : contrainte déformation linéaire.
- Un état de coexistence Solide-Fluide : $\sigma_1 < \sigma < \sigma_2$ caractérisé par une compétition entre la destruction et la reformation du gel
- Un état purement visqueux : $\sigma > \sigma_2$ caractérisé par une dépendance entre contrainte et déformation modélisée par une loi de puissance.

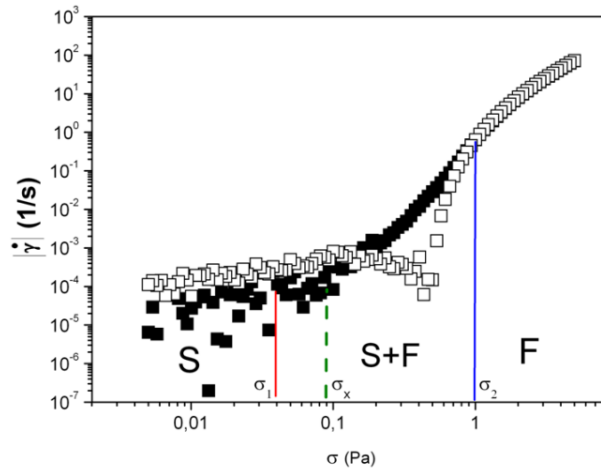


Figure 2 : Courbes d'écoulement en mode contrainte contrôlée pour une solution de Carbopol 0.05 wt% : Dépendance de la vitesse de cisaillement (valeurs absolues) avec la contrainte appliquée, les cubes pleins correspondent au test aller, les cubes vides correspondent au test retour, trait discontinu délimite l'état rhéologique, S : solide, F : fluide

Les mesures rhéologiques ont été faites pour six concentrations (0.05%-0.06%-0.075%-0.08%-0.1%-0.11%). En analysant les courbes rhéologiques avec un modèle de type Herschel-Bulkley, les six concentrations présentent un comportement à seuil (Figure 3).

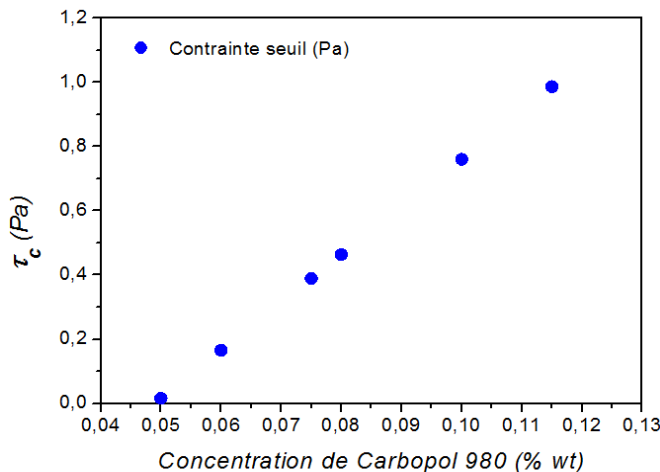


Figure 3 : Evolution de la contrainte seuil en fonction de la concentration en Carbopol

Concentration (% wt)	τ_c (Pa)
0,05	0,016
0,06	0,1652
0,075	0,389
0,08	0,4636
0,1	0,76
0,115	0,9858

Tableau 1 : Variation de la contrainte seuil avec la concentration

2.2. Présentation du dispositif expérimental et des techniques de mesure associées

Le dispositif expérimental a été réalisé complètement au sein du laboratoire. Il est représenté sur la figure 4. Il est constitué essentiellement d'une cavité contenant le fluide de dimensions intérieures 386 mm×186 mm×20 mm. Le fluide de travail est contenu dans une cellule de hauteur h, les plans extrêmes supérieur et inférieur sont isothermes aux températures T_0 et $T_0+\Delta T_0$, la régulation de température est assurée à l'aide des résistances chauffantes sur la plaque inférieure. La partie haute de la cavité est refroidie grâce à une circulation d'antigel en régime turbulent, générée à l'aide d'un bain thermostaté.

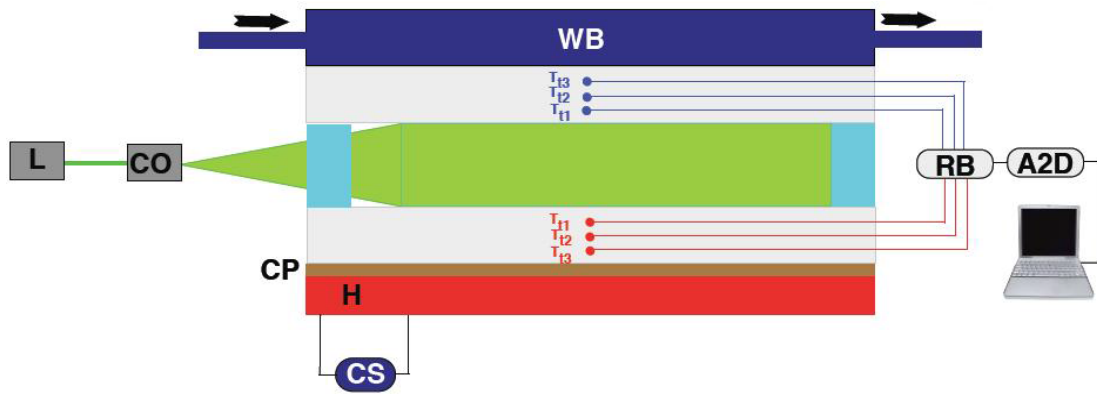


Figure 4 : Schéma représentatif du dispositif expérimental (L : laser, WB : circulation froide de l'eau, H : source chaude, A2D : convertisseur analogique numérique, R-B : boîte de référence, CP : plaque de cuivre pour l'homogénéisation de température.

Une fois le régime permanent établi, on commence à chauffer le fluide par le bas à l'aide de 3 résistances électriques de 8.3Ω chacune. On fait varier le courant électrique de 0.5A à 2.3A de façon croissante puis décroissante. Pour s'assurer de l'homogénéité en température des plaques supérieures et inférieures, une cartographie infrarouge a été réalisée sur l'enceinte qui contient le fluide complexe, comme l'indique la figure 5.

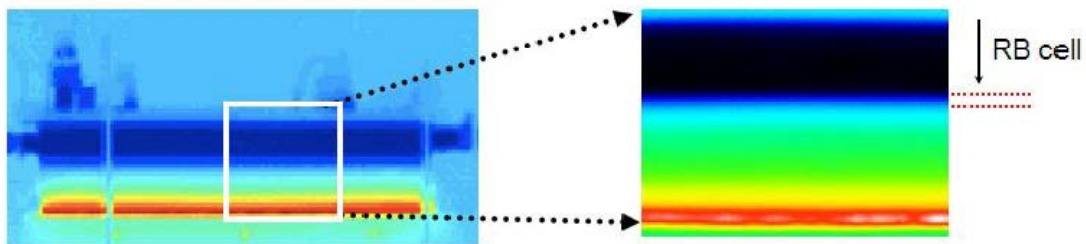


Figure 5 : Dispositif expérimental-cartographie infrarouge

Six thermocouples de type k sont insérés de part et d'autre de l'enceinte de fluide au niveau des plaques de polycarbonate. La plaque de polycarbonate positionnée entre la source froide et le fluide, ainsi que la plaque de polycarbonate et la plaque de cuivre positionnée entre la source chaude et le fluide, assurent l'uniformité des températures au niveau des points de contact entre le fluide et les plaques de polycarbonate comme illustré dans la cartographie infrarouge. Le fluide est ainsi soumis à des conditions limites de type température constante (température froide en haut et température chaude en bas). Les plaques de polycarbonate instrumentées de thermocouples, permettent une mesure du gradient de température au sein des plaques. Par extrapolation, la température pariétale fluide-plaque est obtenue sans perturber la zone de mesure.

La technique de visualisation est basée sur le suivi de particules de polyamide de $20\mu\text{m}$ de diamètre. Ces visualisations permettent d'observer les structures thermo-convectives et de réaliser la mesure des champs de vitesse. Le système de visualisation optique est constitué essentiellement (figure 4) :

- d'un laser (Ray Power 2000-DANTEC DYNAMYCS) avec une puissance maximale de 5 Watts

- d'une lentille cylindrique (THOR-LABS) qui transforme le faisceau laser cylindrique en une nappe laser verticale

- d'une lentille convergente qui focalise le faisceau laser sur la zone de visualisation

- d'une caméra (THOR-LABS) pour prendre des vidéos en temps réel
- d'un logiciel de post-traitement qui permet de remonter depuis la vidéo enregistrée avec la caméra jusqu'au tracé du gradient de vitesse (DPIV)

3. Présentation des résultats expérimentaux

3.1. Validation du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental et les techniques de mesures ont été validées en utilisant un fluide newtonien (Glycérine pure : Figure 6) avec les propriétés suivantes : $\alpha = 5 \times 10^{-4} K^{-1}$, $\nu = 872 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$, $\kappa = 1.37 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$, $d = 2 cm$, $\Delta T = 5.3^\circ C$ (correspond au gradient de température de la transition du régime conductif vers le régime convectif). Le nombre de Rayleigh critique calculé est $Ra_c \approx 1774$. Ce résultat est en conformité avec la valeur théorique du Rayleigh critique $Ra'_c = 1708$ (erreur relative inférieure à 4%).

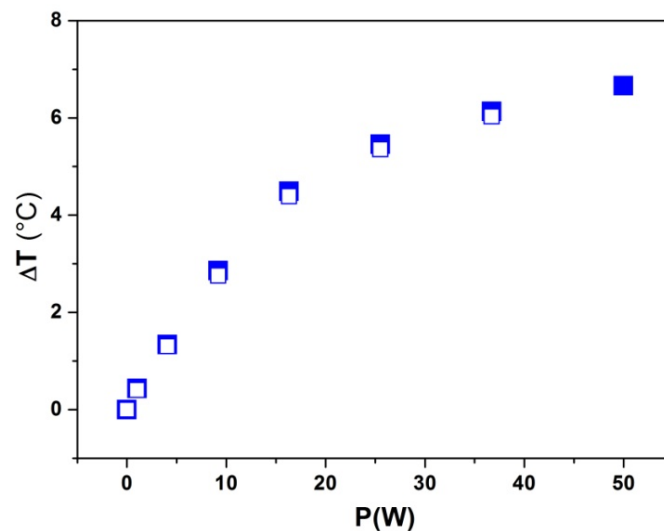


Figure 6 : Gradient de température en fonction de la puissance injectée pour la glycérine, les symboles pleins correspondent aux essais ascendants, les symboles vides correspondent aux essais descendants.

3.2. Essais avec le fluide à seuil Carbopol 980

Les essais réalisés pour six types de concentrations de Carbopol 980 (0.05%-0.06%-0.075%-0.08%-0.1%-0.11%) ont consisté à augmenter la différence de température imposée, à la mesurer une fois le régime thermique établi et à mesurer en parallèle les champs de vitesse. La figure 7 représente l'évolution du gradient de température en fonction de la puissance injectée pour différentes concentrations de Carbopol. En observant la figure 7, on constate que le phénomène physique est réversible (les points d'aller se confondent avec ceux du retour). Les courbes peuvent être décomposées en deux parties distinctes. Une première partie est linéaire. Le transfert thermique au sein du fluide est purement conductif. Le changement de pente de cette courbe indique que l'échange n'est plus uniquement conductif. Un nouveau mode de transfert de la chaleur qui apparaît (transfert convectif) et qui vient s'ajouter au transfert par conduction, ce qui engendre une diminution de la différence de température (la convection augmente l'homogénéisation de la température dans le fluide).

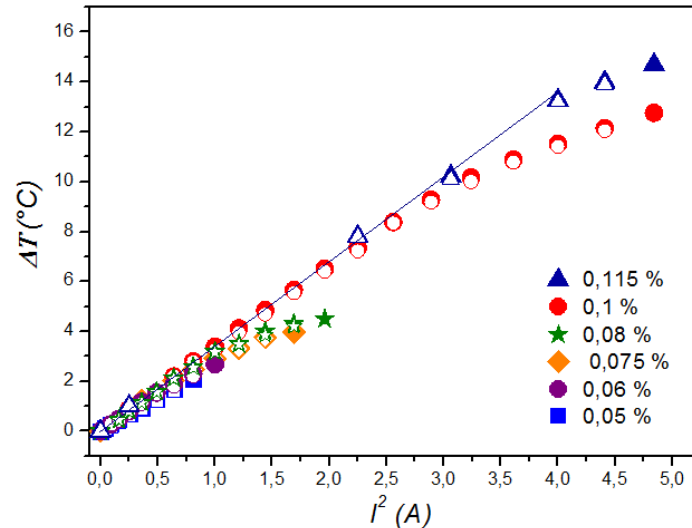


Figure 7 : Gradient de température en fonction de la puissance injectée, les symboles pleins correspondent aux essais ascendants, les symboles vides correspondent aux essais descendants.

Ce résultat est confirmé par l'observation et la mesure des champs de vitesse des structures convectives présentée sur la Figure 8. Par exemple, pour une concentration à 0.05 wt%, la formation des rouleaux de Rayleigh Bénard ne se fait pas dès l'apparition de l'instabilité caractérisée par le changement de pente du gradient de température, mais progressivement jusqu'à aboutir à la forme finale.

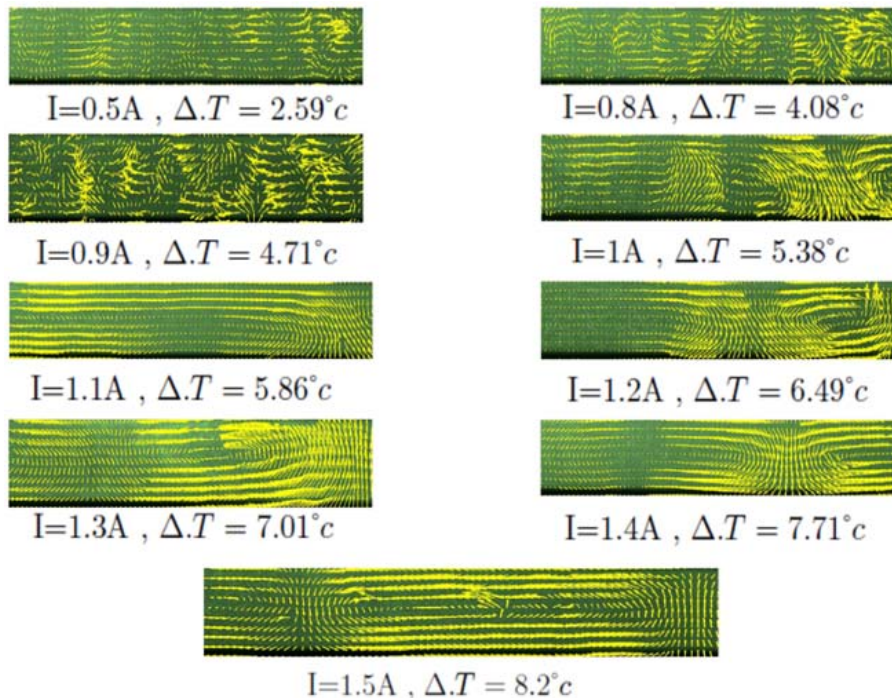


Figure 8 : Evolution des rouleaux de Rayleigh-Bénard dans le Carbopol 980 (0.05 wt%) en fonction de la puissance injectée.

4. Conclusion et perspectives

Alors que la bibliographie indiquait que la contrainte seuil empêche le développement de l'instabilité de Rayleigh-Bénard [8], les résultats expérimentaux mettent évidence l'apparition du mode convectif et que le phénomène est réversible en aller retour, et cela pour différentes concentrations de fluide.

L'étape suivante va être de mesurer les champs de température dans le volume par utilisation de cristaux liquides, et aussi de regarder plus finement l'interaction entre le modèle rhéologique le plus pertinent et les gradients de vitesse présents dans la cavité. L'effet du glissement à la paroi sera aussi abordé.

Remerciements

Ces travaux ont bénéficié d'un financement dans le cadre de l'ANR blanche ThIM. Les auteurs souhaitent remercier Christophe Le Bozec pour le travail réalisé lors de la mise en route du dispositif expérimental.

Références

- [1] S. Chandrasekhar, *Hydrodynamic and hydromagnetic stability* (Clarendon Press, Oxford, 1961).
- [2] P.G. Drazin & H.W. Reid, *Hydrodynamic stability*, Cambridge University Press (1981).
- [3] E. L. Koschmieder, *Bénard Cells and Taylor vortices*, Cambridge University Press, (1993).
- [4] J. Zhang, D. Vola, I. Frigaard, *Yield stress effects on Rayleigh-Bénard convection*, *J. Fluid Mech.*, **566**, 389-419, (2006).
- [5] A.C. Rust, N. Balmforth, and A.M. Jellinek, *The nature of yield strength and effects on Rayleigh-Bénard convection*, *Geophysical Research Abstracts*, **8**, 1173-1178 (1969).
- [6] A. Abdelali, A. Magnin, J.-M. Piau, C. Métivier, *private communication* (2008).
- [7] A. M.V. Putz, T. I. Burghlea *Rheologica Acta* 48, 673-689 (2009).
- [8] Weakly nonlinear viscoplastic convection (Neil J. Balmforth-Alison C. Rust, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics: Volume 158, Issues 1-3, May 2009, Pages 36-45*).